

GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS MEDIANTE MODULADORES ESPACIALES DE LUZ

TRABAJO DE GRADO

Santiago Echeverri Chacón
sechev14@eafit.edu.co

ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FÍSICAS
MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA
UNIVERSIDAD EAFIT
2015

GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS MEDIANTE MODULADORES ESPACIALES DE LUZ

Santiago Echeverri Chacón
sechev14@eafit.edu.co

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MÁGISTER EN FÍSICA
APLICADA

DIRECTOR: René Restrepo Gómez
rrestre6@eafit.edu.co

ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FÍSICAS
MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA
UNIVERSIDAD EAFIT
2015

*“The first principle is that you must not fool yourself - and
you are the easiest person to fool...”*

Richard P. Feynman

A mis padres

Agradecimientos

Muchas gracias.

Santiago
abril 2015

Resumen

Escribir un resumen decente

Índice general

Acrónimos y Nomenclatura	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	5
1.2. Estado del Arte	5
1.3. Estructura	5
I Implementación de una plataforma para la caracterización de un SLM	10

Índice de figuras

1.1. Las figuras a) y b) representan mapas de fase de haces con OAM 0 y +1 definidos en el intervalo $[-\pi, \pi]$. Las intensidades correspondientes luego de enfocar los haces en un plano de observación se muestran en las figuras c) y d).	2
---	---

Acrnimos y Nomenclatura

AIV Armado, Integración y Verificación

AO Óptica Adaptativa - Adaptive Optics

APAN Nemático Antiparalelo - Anti-Parallel Nematic

ASD Descomposición espectral angular - Angular Spectrum Decomposition

BS Divisor de haz - Beam Splitter

CCD Dispositivo de Carga acoplada

CMOS Semiconductor Complementario de Óxido Metálico

CTE Coeficiente de Expansión Térmica

ENO Observatorios Europeos del Hemisferio Norte - European Northern Observatory

ESA Agencia Espacial Europea

ESPI Interferometría de Patrones de Speckle Electrónica

FDT Full Disk Telescope - Telescopio de Disco Completo

FEA Análisis de Elementos Finitos

FEM Modelo de Elementos Finitos

FOV Campo de Visión - Field of View

FPGA Field-programmable gate array

FWHM Anchura Total a la mitad del Máximo

GACE Grupo de Astronomía y Ciencias del Espacio

GS Método de Gerchberg-Saxton

GTC Gran Telescopio de Canarias

HDR Alto Rango Dinámico

HRT High Resolution Telescope - Telescopio de Alta Resolución

IAA Instituto de Astrofísica de Andalucía

IAC Instituto de Astrofísica de Canarias

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IWCOG Método Iterativo de Compensación del Centro de Gravedad

LBD Globos de Larga Duración - Long Duration Balloon

LC Cristal Líquido

LCVR Retardadores Variables de Cristal Líquido

LINES Laboratorio de Instrumentación Espacial

LK Método Lucas-Kanade

MTF Modulación de la función de transferencia óptica - Modulation Transfer Function

NASA Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de USA - National Aeronautics and Space Administration

OAM Momento Orbital Angular

OGS Optical Ground Station

OTF Función de transferencia óptica - Optical transfer function

PD Diversidad de Fase - Phase Diversity

PHI Polarimetric and Helioseismic Imager

PMP Polarization Modulation Package - Paquete de Modulación de la Polarización

PSF Función de Punto Esparcido - Point Spread Function

RFM Refocus Mechanism

RMSE Error cuadrático medio

SBMIR Single-beam Multiple-Intensity Reconstruction Technique

SH Shack-Hartmann

SLM Modulador Espacial de Luz

SNR Coeficiente señal-ruido

SPT Transformada Espiral de Fase

TUM Technische Universität München - Universidad Tecnológica de Munich

TVC Cámara de Termo-Vacío

VCSEL Láser Emisor de Superficie de Cavidad Vertical

WCOG Método de Compensación del Centro de Gravedad

WFE Error del frente de onda - Wavefront error

WHT William Herschel Telescope

Introducción

Como es bien sabido, la luz transporta energía; esto se hace evidente al comparar las temperaturas en el día y en la noche o al iluminar una celda fotovoltaica. En su representación cuántica, la luz está compuesta por partículas sin masa llamadas fotones. Al no tener masa, su energía está directamente asociada a su momento, y el momento de los fotones así como el de otras partículas en la mecánica cuántica puede ser tanto lineal como angular. El momento angular se compone a su vez de dos contribuciones, la de spin y la orbital. Desde un punto de vista macroscópico, el momento angular de spin se asocia con la polarización de la luz, es decir con la dirección de oscilación de los campos eléctrico y magnético con respecto a un eje coordenado. Asimismo, el momento angular orbital (OAM) se asocia con las distribuciones espaciales de la amplitud y la fase, tal y como se observan en un plano perpendicular a la propagación de la luz. Para aclarar esta idea comparemos dos haces polarizados linealmente, uno con OAM cero, y el otro con OAM +1. El haz de luz que carece de momento angular orbital presenta una distribución de fase constante. Si éste tiene una distribución de amplitud Gaussiana, al ser enfocado por una lente, en un plano de observación veremos que la distribución de intensidad está dada por una función de Airy como la que se ilustra en la figura 1.1c).

lp;./['

Por el contrario, el haz con OAM +1 posee una distribución de fase helicoidal donde el valor de la fase varía azimutalmente desde π a $-\pi$ radianes como se muestra en la figura 1.1b). Haces con distribuciones de fase de este tipo poseen una indeterminación de la fase en el centro dado que en la coordenada $r = 0$ confluyen fotones con todos los valores

posibles de fase. La consecuencia directa de la indeterminación en este tipo de puntos es la ausencia de luz por efecto de superposición. Si, como en el caso anterior, observamos la intensidad en un plano de enfoque veremos perfil con forma de dona como la de la figura 1.1 d).

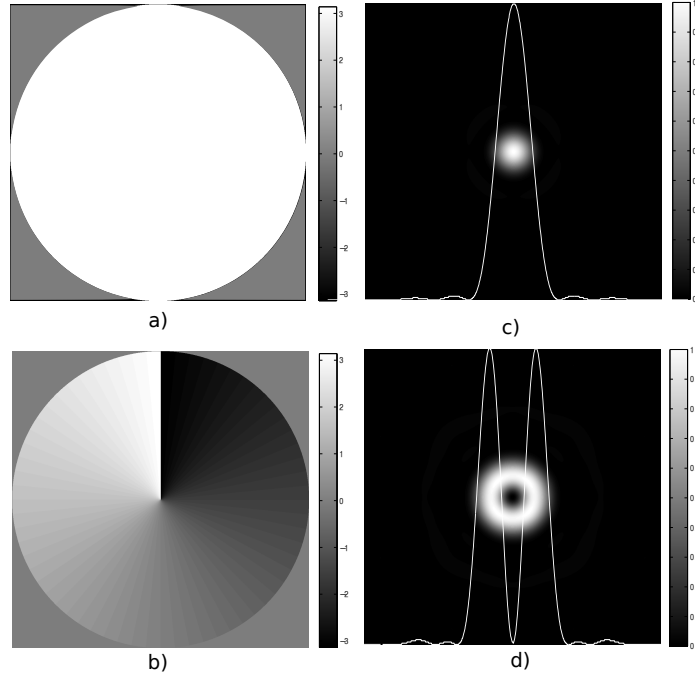


Figura 1.1: Las figuras a) y b) representan mapas de fase de haces con OAM 0 y +1 definidos en el intervalo $[-\pi, \pi]$. Las intensidades correspondientes luego de enfocar los haces en un plano de observación se muestran en las figuras c) y d).

Por su naturaleza rotacional, los puntos alrededor de los cuales la fase varía de $-\pi$ a π se conocen como **vórtices ópticos** (VO), y están presentes siempre que haya haces con momento angular orbital distinto de cero. Por otra parte, de forma similar a cómo se describe la amplitud en haces con OAM cero como “Gaussiana”, los haces con momento angular distinto de cero se describen matemáticamente como haces “**Laguerre-Gauss**” (LG). Esto se debe a que soluciones de la ecuación de onda en coordenadas cilíndricas incluyen no sólo una componente de amplitud Gaussiana, sino también una dependencia radial y azimutal descrita por polinomios de Laguerre, con los cuales se pueden representar vórtices ópticos de fase y amplitudes del tipo dona. El estudio, y el desarrollo de aplicaciones sobre los haces Laguerre-Gauss y por consecuencia, de los VO, requiere entonces de la capacidad de manipular el OAM de haces de luz.

El momento angular orbital añade un grado de libertad al conjunto de propiedades que pueden ser manipuladas y que caracterizan a la luz, en particular: la polarización o espín, la coherencia, el espectro y la cantidad de energía. Siendo así, la posibilidad de manipular el momento angular orbital abre camino a un amplio rango de aplicaciones en numerosas áreas de la ciencia y la tecnología, tanto en el mundo microscópico (células y micromanipulación) como en el macroscópico (astronomía y telecomunicaciones).

Por listar brevemente algunas aplicaciones de los haces con OAM distinto de cero se pueden mencionar: El uso de OAM en telecomunicaciones ópticas como una nueva variable para multiplexación de señales en fibra y en espacio libre [1, 2, 2–4]. En microscopía óptica para resaltar bordes de muestras biológicas transparentes [5, 6], e identificar curvaturas de objetos de fase por medio de interferometría espiral [7]. Además, es una herramienta esencial para la manipulación de objetos en la escala micro al ser usados como pinzas ópticas capaces de atrapar y mover partículas [8]. Se espera también un avance importante en el campo de la computación cuántica vía entrelazamiento cuántico de OAM en fotones [9]. Fuera de las anteriores, cabe destacar algunas de las patentes relacionadas con el tema como: aplicaciones en imagenología médica de resonancia magnética nuclear [10], y teledetección de objetivos militares [11]. También han sido patentadas herramientas y métodos para micromanipulación de partículas microscópicas [12], con posibles aplicaciones en bombas peristálticas para microfluidos [13]. Para concluir, cabe mencionar que hoy en día la radiación óptica no es la única que está siendo usada para la propagación del momento angular orbital; destacan trabajos en los cuales se utilizan los regímenes de ondas de radio [14], rayos X [15], e inclusive haces de electrones [13] para transmitir OAM.

Las referencias y ejemplos mencionados respaldan e ilustran el intenso interés que se ha generado sobre el tema en la comunidad científica, y en particular en las áreas de óptica aplicada y fotónica. En Colombia, el tema de los vórtices ópticos es un área incipiente pero fértil. A nivel nacional se destaca una primera iniciativa teórica por parte del grupo de óptica e información cuántica de la Universidad Nacional sede Bogotá, en la cual se estudió la propagación de haces con OAM distinto de cero en elementos ópticos conocidos como axicones [16]. Asimismo, en el grupo de óptica y tratamiento de señales de la Universidad Industrial de Santander han trabajado en el diseño de un codificador optoelectrónico basado en el momento angular [17, 18]. Es, sin embargo en el ámbito regional de Antioquia en el cual se concentra la mayor cantidad de esfuerzos en Colombia. El grupo de Óptica y Procesamiento Opto-digital de la Universidad Nacional sede Medellín desarrolló un sis-

tema de pinzas ópticas para la manipulación de microsistemas [19], mientras que el grupo de Óptica y Fotónica de la Universidad de Antioquia ha estudiado la Multiplexación de Información Encriptada y Codificación con Momento Angular Orbital [20], así como la generación experimental de vórtices ópticos con moduladores de transmisión [21, 22]. Además de los esfuerzos de cada institución, destaca el trabajo colaborativo que se ha afianzado en el marco de convenios de cooperación tales como el proyecto interinstitucional titulado:

Aberraciones ópticas en haces Laguerre-Gaussianos: corrección y aplicaciones metrológicas.

Este es un proyecto cuya duración es de 24 meses, que comenzó a ejecutarse el 5 de agosto de 2013 y que culminará el 5 de agosto de 2015. Se desarrolla con la participación de grupos de la Universidad EAFIT, la Universidad de Antioquia, el Centro de Investigaciones Ópticas de Argentina, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, y el Instituto Tecnológico Metropolitano.

De proyectos como este, se ha formado una red de grupos interesados específicamente en el estudio de VO. En particular, la cooperación entre algunos de estos grupos derivó en trabajos en los cuales se estudió el efecto de la birrefringencia inducida por cristales birrefringentes en vórtices ópticos [?], y la posibilidad de generar vórtices con una cantidad reducida de niveles de gris en moduladores de transmisión [22]. De forma similar, la Universidad EAFIT, a través de su grupo de Óptica Aplicada y en cooperación con el Centro de Investigaciones Ópticas de Argentina, ha contribuido con el desarrollo de técnicas metrológicas computacionales basadas en el estudio de vórtices en patrones de speckle [23–27].

Con la iniciativa de adquirir las capacidades técnicas y experimentales necesarias para el desarrollo de aplicaciones metrológicas de vórtices ópticos, el grupo de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT ha abierto dos proyectos internos, y ha sido merecedor de una beca del programa Jóvenes Investigadores de Colciencias, convocatoria 645 a cursar en el 2015. Las prioridades del grupo, y asimismo los temas de trabajo de estos dos proyectos son:

- El desarrollo de aplicaciones metrológicas de haces Laguerre Gauss.
- La implementación de técnicas basadas en los haces con OAM distinto de cero para instrumentos de microscopia de objetos de fase.

Es, en este contexto, que desde Julio del 2013 he venido realizando mi labor de investigación en la línea de metrología óptica del grupo de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT en el

proyecto interinstitucional *Aberraciones ópticas en haces Laguerre-Gaussianos: corrección y aplicaciones metrológicas* gozando del beneficio de un beca de Maestría.

Mediante la presente propuesta de Trabajo de Grado se busca proponer un proyecto final de maestría con el cual se pueda concluir y documentar un proceso académico e investigativo de dos años que va a permitirle al grupo de Óptica Aplicada abrir nuevas áreas de trabajo. Específicamente, se propone terminar de desarrollar las capacidades técnicas y habilidades necesarias para la manipulación del OAM y la generación de VO con miras a la exploración de nuevas aplicaciones de VO en la metrología óptica y la microscopía.

En adelante, en la sección ?? se presentará el planteamiento del problema. En la sección ??, se presentará un breve marco teórico y estado del arte que dará soporte a las proposiciones del planteamiento del problema. Y en la sección ?? se presentará el objetivo general y enumerarán los objetivos específicos que deben ser cumplidos al finalizar el proyecto. Luego, en la sección ?? se hará una descripción de las actividades a realizar para la consecución de los objetivos específicos, y se presentará un cronograma (sección ??) que establece los tiempos en los cuales se deben cumplir. Finalmente, se presenta una descripción de los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto y se listan las referencias bibliográficas consultadas.

1.1 Motivación y objetivos

1.2 Estado del Arte

1.3 Estructura

El texto principal de este trabajo, está dividido en 2 partes temáticas que agrupan los Capítulos. A continuación, se presenta la estructura general de la disertación por Partes y Capítulos:

Parte I: Implementación de una plataforma para la caracterización de un SLM

Parte ??: Caracterización y corrección de aberraciones de VO

Parte ??: Recuperación de fase con métodos no interferométricos

Bibliografia

- [1] J. Lin, X.-C. Yuan, S. H. Tao, and R. E. Burge. Multiplexing free-space optical signals using superimposed collinear orbital angular momentum states. *Applied Optics*, 46(21):4680–4685, July 2007. doi: 10.1364/AO.46.004680. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-46-21-4680>.
- [2] Graham Gibson, Johannes Courtial, Miles Padgett, Mikhail Vasnetsov, Valeriy Pas’ko, Stephen Barnett, and Sonja Franke-Arnold. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Optics Express*, 12(22):5448–5456, November 2004. doi: 10.1364/OPEX.12.005448. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-12-22-5448>.
- [3] Nicolas K. Fontaine, Christopher R. Doerr, and Larry Buhl. Efficient multiplexing and demultiplexing of free-space orbital angular momentum using photonic integrated circuits. In *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest, page OTu1I.2. Optical Society of America, March 2012. doi: 10.1364/OFC.2012.OTu1I.2. URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2012-OTu1I.2>.
- [4] Nenad Bozinovic, Yang Yue, Yongxiong Ren, Moshe Tur, Poul Kristensen, Hao Huang, Alan E. Willner, and Siddharth Ramachandran. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science*, 340(6140):1545–1548, June 2013. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi: 10.1126/science.1237861. URL <http://www.sciencemag.org/content/340/6140/1545>.
- [5] Alexander Jesacher, Severin Fürhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy. *Physical Review Letters*, 94(23):233902, June 2005. doi: 10.1103/PhysRevLett.94.233902. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.94.233902>.
- [6] Petr Bouchal and Zdeněk Bouchal. Selective edge enhancement in three-dimensional vortex imaging with incoherent light. *Optics Letters*, 37(14):2949–2951, July 2012. doi: 10.1364/OL.37.002949. URL <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-37-14-2949>.
- [7] Severin Fürhapter, Alexander Jesacher, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte. Spiral interferometry. *Optics Letters*, 30(15):1953–1955, August 2005. doi: 10.1364/OL.30.001953. URL <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-30-15-1953>.

-
- [8] David G. Grier. A revolution in optical manipulation. *Nature*, 424(6950): 810–816, 2003. URL <http://www.nature.com/nature/journal/v424/n6950/abs/nature01935.html>.
- [9] Alois Mair, Alipasha Vaziri, Gregor Weihs, and Anton Zeilinger. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature*, 412(6844):313–316, July 2001. ISSN 0028-0836. doi: 10.1038/35085529. URL <http://www.nature.com/nature/journal/v412/n6844/full/412313a0.html>.
- [10] Daniel R. Elgort and Lucian Remus Albu. Active device tracking using light with orbital angular momentum to hyperpolarized MRI, December 2013. URL <http://www.google.com/patents/US8611982>. U.S. Classification 600/423, 324/307, 600/420; International Classification G01V3/00; Cooperative Classification A61B2019/5231, A61B19/5244, A61B5/055, A61B2019/5251, A61B5/06, A61B2019/5236.
- [11] Harry A. Schmitt, Donald E. Waagen, Nitesh N. Shah, Delmar L. Barker, and Andrew D. Greentree. System and method of orbital angular momentum (OAM) diverse signal processing using classical beams, April 2010. URL <http://www.google.com/patents/US7701381>. U.S. Classification 342/42, 340/572.7, 340/572.2; International Classification G01S13/74; Cooperative Classification G01S7/499, G01S7/024, G01S17/74, G01S13/78, G01S13/751; European Classification G01S17/74, G01S13/75C, G01S7/499, G01S7/02P, G01S13/78.
- [12] David G. Grier. Holographic microfabrication and characterization system for soft matter and biological systems, April 2013. URL <http://www.google.com/patents/US8431884>. U.S. Classification 250/251; International Classification H01S3/10; Cooperative Classification G02B5/001, G03H1/08, G02B21/32, G02B5/32, G03H1/2294, G03H2001/0077.
- [13] Giulio Guzzinati, Laura Clark, Armand B  ch  , and Jo Verbeeck. Measuring the orbital angular momentum of electron beams. *Physical Review A*, 89(2):025803, February 2014. doi: 10.1103/PhysRevA.89.025803. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.89.025803>.
- [14] B. Thid  , H. Then, J. S  jholm, K. Palmer, J. Bergman, T. D. Carozzi, Ya. N. Istomin, N. H. Ibragimov, and R. Khamitova. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Physical Review Letters*, 99(8):087701, August 2007. doi: 10.1103/PhysRevLett.99.087701. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.087701>.

-
- [15] Shigemi Sasaki and Ian McNulty. Proposal for generating brilliant x-ray beams carrying orbital angular momentum. *Physical Review Letters*, 100(12):124801, March 2008. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.124801. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.124801>.
- [16] Ángela M. Guzmán, Claudia P. Barrera, Jefferson Flórez, and Florencio E. Hernández. Difracción de luz con momento angular orbital por un axicon. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2):31–36, 2009. URL http://publicacion27.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2009_02/01032010/art_05.pdf.
- [17] Cristian Acevedo. *Análisis teórico-experimental de un haz con momento angular orbital entero y no entero*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander Colombia, 2012. URL <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7339/2/144386.pdf>.
- [18] Carlos Fernando Díaz Meza, Cristian Hernando Acevedo Cáceres, Yezid Torres Moreno, and Jaime Guillermo Barrero Pérez. Modelado preliminar de un codificador optoelectrónico para la transferencia de datos sobre el momento angular orbital de la luz. *REVISTA UIS INGENIERÍAS*, 11(1), May 2013. ISSN 2145-8456. URL <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/3193>.
- [19] María Isabel Alvarez. *Implementación de Pinzas Ópticas Holográficas para la Manipulación de Microsistemas*. Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2011. URL http://www.bdigital.unal.edu.co/6814/1/43977451._1_2012.pdf.
- [20] Carlos Andres Rios. *Procesamiento Óptico para la Multiplexación de Información Encriptada y Codificación con Momento Angular Orbital*. Pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2010. URL <http://barlai.udea.edu.co/index.php/es/divulgacion/premios-y-reconocimientos/337-procesamiento-optico-para-la-multiplexacion-de-informacion-encriptada-y-codific>.
- [21] David Muñeton. *Generación y caracterización de vórtices ópticos*. Pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2012. URL <http://barlai.udea.edu.co/index.php/es/docencia/trabajos-pregrado/637-generacion-y-caracterizacion-de-vortices-opticos>.

-
- [22] E. Rueda, D. Muñetón, J. A. Gómez, and A. Lencina. High-quality optical vortex-beam generation by using a multilevel vortex-producing lens. *Optics Letters*, 38(19):3941, October 2013. ISSN 0146-9592, 1539-4794. doi: 10.1364/OL.38.003941. URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-38-19-3941>.
- [23] Luciano Angel-Toro, Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, and Néstor Bolognini. Speckle decorrelation influence on measurements quality in vortex metrology. *Optics Communications*, 285(21–22):4312–4316, October 2012. ISSN 0030-4018. doi: 10.1016/j.optcom.2012.07.021. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401812006694>.
- [24] Luciano Angel-Toro, Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, and Néstor Bolognini. Vortex metrology using fourier analysis techniques: vortex networks correlation fringes. *Applied Optics*, 51(30):7411–7419, October 2012. ISSN 1539-4522.
- [25] Luciano Angel-Toro, Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, and Néstor Bolognini. In-plane displacement measurement in vortex metrology by synthetic network correlation fringes. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 30(3):462–469, March 2013. ISSN 1520-8532.
- [26] Daniel Sierra-Sosa, Luciano Angel-Toro, Nestor Bolognini, and Myrian Tebaldi. Novel vortex-transform for high frequency modulated patterns. *Optics Express*, 21(20):23706–23711, October 2013. doi: 10.1364/OE.21.023706. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-21-20-23706>.
- [27] Daniel Sierra-Sosa and Luciano Angel-Toro. VORTEX-SIM, October 2013.

Parte I

Implementación de una plataforma para la caracterización de un SLM